

粉垄耕作提高土壤养分有效性并促进甘蔗维管组织发育和养分吸收

李浩¹, 黄金玲¹, 李志刚¹, 韦本辉², 陈晓茹¹, 韩世健¹, 梁晓莹¹, 李素丽^{1*}

(1 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2 广西农业科学院经济作物研究所, 广西南宁 530007)

摘要: 【目的】研究粉垄耕作对宿根蔗和新植蔗生长过程中土壤养分含量、甘蔗对养分吸收以及植株解剖形态的影响, 为粉垄耕作技术推广提供理论依据。【方法】以桂糖 42 号为供试材料进行田间试验, 以常规耕作为对照 (CK, 耕作深度 25 cm), 粉垄耕作 (垂直旋深 40 cm) 为处理, 甘蔗种植采用新植甘蔗和宿根两种方法。在甘蔗主要生育期, 采集植株和土壤样品, 测定土壤中速效氮磷钾含量以及甘蔗对养分的吸收和积累量, 同时测定叶中氮代谢酶活性和根系活力, 观测根系维管束形态结构, 并测定根系活力。【结果】与常规耕作相比, 粉垄耕作条件下, 土壤容重降低了 8.6%~16.9%, 土壤速效氮、有效磷含量分别提高了 8.7%~77.6% 和 8.2%~25.6%, 差异显著; 甘蔗叶片氮磷含量提高, 增幅分别为 11.4%~19.4% 和 5.3%~34.8%; 显著提高了甘蔗出苗率、分蘖率、株高、茎径、有效茎数、产量。粉垄耕作下, 甘蔗茎维管束更大, 分布更密集, 蔗茎维管束数量、维管束面积、后生木质部导管直径、韧皮部面积显著增加, 新植蔗和宿根蔗茎维管束面积分别增加了 15.2% 和 16.7%, 维管束数量分别增加 28.0% 和 17.8%; 后生木质部导管直径分别提高 7.8% 和 7.9%; 韧皮部面积分别增加 29.7% 和 30.8%; 在苗期、伸长期和成熟期, 粉垄耕作的甘蔗根系活力分别比传统耕作处理增加了 1.29、1.39 和 1.25 倍, 新植蔗叶谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性分别增加了 149.6%、36.5% 和 65.6%, 宿根蔗叶 GS 活性分别增加了 65.9%、36.0% 和 93.3% ($P < 0.05$); 在苗期和伸长期, 新植蔗叶片谷氨酸合成酶 (GOGAT) 分别显著提高了 40.3% 和 69.1%, 宿根蔗分别增加 37.9% 和 42.4%; 苗期粉垄耕作宿根蔗亚硝酸还原酶 (NR) 活性显著高于常规耕作甘蔗 9.5%。【结论】粉垄耕作可改善土壤理化性状, 提高速效氮磷含量, 改善甘蔗维管组织, 提高甘蔗体内氮磷含量, 提高根系活力和氮代谢相关酶活性, 有利于甘蔗吸收和转运氮素, 促进了氮代谢和氨基酸的合成, 为蛋白质的合成提供了物质基础, 促进甘蔗生长发育, 实现甘蔗增产增收。

关键词: 粉垄耕作; 甘蔗; 土壤速效养分含量; 土壤容重; 氮代谢酶活性; 维管组织; 产量

Fenlong tillage increase soil nutrient availability, and benefit vascular tissue structure and nutrient absorption of sugarcane

LI Hao¹, Huang Jin-ling¹, LI Zhi-gang¹, WEI Ben-hui², CHEN Xiao-ru¹, HAN Shi-jian¹, LIANG Xiao-ying¹, LI Su-li^{1*}

(1 Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Institute of Economic Crops, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: 【Objectives】Fenlong is a new tillage method that is operated by machine to a depth of 40 cm to break soil hard plant effectively. We studied its beneficial effects on soil and sugarcane plant for the adoption of the new tillage technology. 【Methods】Sugarcane cultivar of Guitang42 was used as the test crop in a two-year field experiment in Guangxi Province. The traditional plough (25 cm deep) was used as the control (CK) and Fenlong tillage (40 cm deep) as the treatment. Sugarcane was planted with plant bud (new cane) and ratoon (ratoon cane). The bulk density and available NPK contents of soils were measured in the main growing stages of sugar cane. The agronomic traits of sugarcane, the vascular bundle morphology and root activity, and the nitrogen metabolism related enzyme activity in leaves were measured. 【Results】Fenlong tillage significantly reduced

收稿日期: 2020-06-28 接受日期: 2020-09-23

基金项目: 广西创新驱动重大专项 (AA17204037-4); 国家自然科学基金项目 (31871689, 31460373)。

联系方式: 李浩 E-mail: dlhao@126.com; * 通信作者 李素丽 E-mail: lisuli88@163.com

soil bulk density by 8.6% to 16.9%, increased soil available N and P by 8.7%–77.6% and 8.2%–25.6%. Compared with CK, the Fenlong tillage raised leaf N and P concentrations by 11.4%–19.4% and 5.3%–34.8%, respectively, increased the seedling rate, tillering rate, plant height, stem diameter, effective stems and yield significantly. Using Fenlong tillage, the vascular bundles of sugarcane plants were larger and more densely distributed, and the number of vascular bundles, vascular bundle area, vessel diameter of metaxylem and phloem area of new sugarcane were increased by 15.2%, 28.0%, 7.8% and 29.7%, respectively, and those of ratoon cane were increased by 16.7%, 17.8%, 7.9% and 30.8%, respectively; the root activity was significantly increased throughout the growth period by 1.25–1.39 times. At the seedling stage, the activities of glutamine synthase (GS) and amino acid synthase (GOGAT) in new cane were enhanced by 149.6% and 40.3%, and the indexes of ratoon cane were 65.9% and 37.9% higher, respectively, as compared to control. Fenlong tillage significantly enhanced nitrite reductase (NR) activity of ratoon cane at the elongation stage by 9.5%, and the GS and GOGAT activities by 36.5% and 69.1%. The indexes of ratoon cane were 36.0% and 42.4% higher with Fenlong than those of control, respectively at the mature stage, and the activities of glutamine synthase (GS) in newly planted sugarcane were 65.6% and the indexes of ratoon cane were 93.3% higher than those of control. 【 Conclusion 】 Fenlong tillage can significantly increase soil nutrient availability and their uptake by sugarcane plants, improve the vascular bundle structure and the activities of enzymes related to N metabolism and root activity. As a result, it promotes the uptake and translocation of water and nutrients, especially N metabolism and amino acid synthesis, providing a material basis for protein synthesis, facilitating plant growth and development on the ground, and increasing sugarcane yield and sugar content.

Key words: Fenlong; sugarcane; soil available nutrient content; soil bulk density; nitrogen metabolic enzyme activity; vascular tissue; yield

耕作方法在农业生产中发挥重要作用, 直接影响土壤理化性状、作物生长和养分吸收^[1-3]。甘蔗是重要的糖料作物, 广西区内种植着我国 60% 以上的甘蔗, 农民传统上采用单一耕作方式(即旋耕, 然后耙地, 开沟种植, 耕层 20—25 cm, 新植蔗 1 年, 宿根 2~3 年)。这种耕作方法耕层浅薄, 通透性、疏松度差, 养分供应不协调, 且在底部土层中形成犁底层, 不利于根系深扎, 对作物生长发育不利^[4-5]。适当的耕作方法可改善土壤性质并提高甘蔗产量^[3, 6]。

粉垄耕作是近年来研发的新型农田耕作技术, 其利用“螺旋型钻头”耕作工具垂直入土 40—50 cm, 高速旋磨切割粉碎土壤, 一次性完成传统耕作的犁、耙、打等作业程序, 达到播种或种植作物的整地标准, 能够较长时间保持耕层相对深松状态^[7-10]。粉垄耕作打破了坚硬的犁底层, 改善了土层结构, 增加孔隙度, 增强土壤水分入渗能力和蓄水能力^[10-13], 显著提高水稻^[14]、玉米^[15]、小麦^[16]、甘蔗^[12, 17-18]等 20 多种作物的产量和品质^[3]。在同等施肥量条件下, 与旋耕、翻耕等耕作方式相比, 粉垄耕作显著促进甘蔗根系发育, 提高甘蔗出苗率、分蘖率、茎径, 增加根长和根重, 在甘蔗伸长后期, 完全展开叶片数增多, 叶宽增加, 提高甘蔗的产量和品质^[12-13]。

施用氮肥有利于叶绿素合成, 增加光合叶面积, 产生更多的同化物, 并改善作物的生长和发育^[19-20], 氮肥与耕作方法相互作用显著^[21-22]。在相同的 N 比率下, 与免耕和深耕深松相比, 粉垄耕作条件下谷物产量增加了 19.1% 和 13.4%, 农艺效率 (AE_N)、氮回收效率 (RE_N) 和氮偏生产力 (PFP_N) 均显著高于免耕和深耕深松^[3]。在小麦季 300 kg/hm² 氮肥投入水平下, 粉垄耕作减施 20% 氮肥仍有利于提高小麦成熟群体穗数, 获得较高小麦产量; 减施 10% 氮肥不会显著降低产量; 减施 30% 氮肥则减产明显^[16]。粉垄耕作与氮肥的互作效应研究主要集中在不同耕作方式、不同施氮水平对粉垄耕作作物农艺性状和产量的影响。土壤养分的吸收取决于作物根系与土壤离子的交换能力, 取决于作物体内的生理生化机制, 如根系活力及氮代谢相关酶活性等生理代谢能力^[23], 旱生作物的主要氮源是 NO_3^- , 土壤 NO_3^- 进入细胞, 在细胞质中硝酸还原酶 (NR) 的作用下形成 NO_2^- , NO_2^- 再进入细胞质体中经亚硝酸还原酶 (NiR) 的催化还原成 NH_4^+ , NH_4^+ 经谷氨酰胺合成酶 (GS) 进一步转化为谷氨酰胺, 再经谷氨酸合成酶 (GOGAT) 催化形成谷氨酸, 谷氨酸是植株体内许多其他氨基酸生物合成的主要氨基供体。但垄耕土壤生态与作

物氮代谢相关酶活性的关系少见报道,本研究探讨粉垄耕作对土壤理化性状和养分含量,甘蔗养分吸收、维管组织结构、根系活力和氮代谢相关酶活性的影响,旨在为粉垄耕作养分高效利用提供理论依据,为粉垄耕作减肥增效、绿色生产提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西壮族自治区南宁市隆安县那桐镇新安村粉垄耕作综合示范基地(22°99'28"N、107°88'52"E),属湿润的亚热带季风气候,年平均气温在21.6℃左右,年均降雨量达1304 mm,平均相对湿度为79%。

试验地土壤为红壤,前茬作物为木薯。经测试土壤容重为2.36 g/cm³,pH 5.73,有机质34.6 g/kg,土壤全氮1.49 g/kg,碱解氮149 mg/kg,全磷0.30 g/kg,有效磷8.49 mg/kg,速效钾394 mg/kg。

1.2 试验设计与甘蔗管理

试验设常规耕作和粉垄耕作2个耕作处理。常规耕作(CK)用传统拖拉机深耕25 cm;粉垄耕作采用广西五丰机械有限公司的自走式粉垄深耕深松机械,耕作深度为40 cm。耕作之后,人工开甘蔗种植沟,宽50 cm,深度与该耕作深度一致。小区面积长10 m×宽6 m,种植5行,行距1.2 m,每个处理重复3次,随机区组排列。

供试甘蔗品种为桂糖42,新植蔗于2018年3月16日下种,采用双芽段种植,蔗种双行摆放,种植密度为11.55×10⁴芽/hm²;宿根蔗在新植蔗砍收后31天,即2019年3月1日进行松蔸管理。新植蔗和宿根蔗分别于2018年6月10日和2019年6月6日进行大培土,大培土时追施尿素(N≥46.4%)675 kg/hm²,氯化钾(K₂O≥60%)675 kg/hm²,复合肥(N:P:K=15:15:15)1500 kg/hm²,田间管理按常规进行。

1.3 农艺性状及产量测定

分别于2018年4月17日、2019年4月11日调查新植、宿根蔗出苗率,于2018年5月11日、2019年6月5日分别调查新植、宿根蔗的分蘖率。

分别于2019年1月19日、2020年1月13日砍收新植、宿根蔗。砍收时每个重复选取20株,测产、测量茎长(甘蔗基部至甘蔗生长点处)、茎径(测甘蔗基部往上第三节、中部和自顶部往下第七节节

间,统计平均值)、有效茎数(以长1 m以上的甘蔗茎作为有效茎),测定小区实际产量然后折算成单位面积产量。从每小区中选具代表性的6株甘蔗于当天送至广西农业科学院甘蔗研究所进行品质测定。

1.4 土壤养分测定

新植蔗分别于2018年4月17日(苗期)、2018年7月2日(伸长期)及2018年10月28日(成熟期),宿根蔗分别于2019年4月10日(苗期)、2019年8月31日(伸长期)及2019年11月3日(成熟期),在各重复中间3行进行取样,取样部位为距离根部10 cm处,用环刀按5点采样法采集20—30 cm深度土样,均匀混合,同时清除石块和动植物残体,带回实验室风干过筛,用于测定土壤碱解氮、有效磷、速效钾以及有机质含量。

土壤养分测定参照《土壤农化分析》^[24],土壤碱解氮含量采用氢氧化钠-硼酸碱解扩散法;速效磷含量采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提、比色法;速效钾含量采用0.5 mol/L NH₄OAc浸提,原子吸收火焰光度法;有机质含量采用重铬酸钾氧化稀释热法测定。

1.5 植株样品采集及相关指标含量测定

植株取样时间同土壤样品。每个小区选取有代表性、长势一致的健壮蔗株10株,小心冲洗根部,洗净根泥并剪去根系。一部分甘蔗根系用于养分测定,一部分样品装入冰盒带回实验室,取白根根尖位置(从根冠往上切取约2~5 cm)测定根系活力;同时,采甘蔗+1叶(即从甘蔗顶端往下数第一片可见叶环的叶片),一部分鲜叶用液氮冷冻,用于测定谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶、亚硝酸还原酶等酶活性,另一部分叶片清洗干净后,会同部分根系,经105℃杀青30 min后,于70℃烘干至恒重,用于养分含量、单株根系及叶片总干重的测定。由于甘蔗茎鲜重及生物量均较大,不易烘干,因此,甘蔗茎仅用于细胞形态指标及蔗糖分含量测定。

采用TTC法进行根系活力测定^[25],谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、亚硝酸还原酶(NR)活性的测定参考《植物生理生化实验教程》^[26]。使用Multiskan GO 1.00.40酶标仪测定OD值,每个样本重复4次。甘蔗蔗糖分含量的测定参考韦增林^[18]的方法。

1.6 茎组织细胞结构观测

于2018年8月21日取甘蔗茎样品,从甘蔗+1叶所处节位往下数,采第5节位节间样品,剪成0.5 cm×0.5 cm小块,放于福尔马林-乙酸-乙醇

(FAA) 固定液中固定, 用于制作石蜡切片。用德国徕卡 RM2255 石蜡切片机进行切片, 用 Smart Digital Camera 观察茎组织细胞结构, 照相。用江苏捷达形态分析软件测量 15 个茎样品切片的维管束鞘面积、后生木质部导管直径、韧皮部面积。

1.7 数据统计及分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据基础整理及制作图表, 用 SPSS 22.0 统计软件进行分析, 通过 ELISA 软件进行酶活力计算。

2 结果与分析

2.1 不同耕作处理对甘蔗农艺性状和产量的影响

粉垄耕作新植蔗出苗率和分蘖率分别比常规耕作提高了 25.0% 和 17.4%; 宿根蔗也分别提高 30.6% 和 11.7%, 各指标均达差异显著水平。砍收时, 粉垄耕作新植蔗株高、茎径、有效茎和产量分别比常规耕作甘蔗提高了 13.2%、17.6%、5.3% 和 18.9%, 各指标均达差异显著水平; 粉垄耕作宿根蔗以上指标也分别比常规耕作提高了 7.7%、22.2%、18.7% 和 12.9%, 除了分蘖率和糖分未达显著差异水平, 其它指标均达显著差异水平 (表 1)。宿根蔗各农艺性状指标均低于新植蔗, 但粉垄耕作宿根蔗各农艺性状及产量指标显著大于常规耕作。

2.2 不同耕作处理对甘蔗养分含量和积累量的影响

表 2 表明, 与常规耕作相比, 粉垄耕作下的新植蔗叶片和根系苗期全磷分别显著增加了 34.8% 和 33.1%; 伸长期叶片全氮和全磷分别增加了 19.4%、12.0% (新植蔗) 和 15.7%、20.6% (宿根蔗), 根系全氮和全磷分别显著增加了 17.3%、32.2% (新植蔗) 和 17.0%、16.3% (宿根蔗); 成熟期叶片全氮和全磷分别显著增加了 19.4%、5.3% (新植蔗) 和 11.4%、29.8% (宿根蔗), 根系全氮和全磷分别显著增加了

21.9%、18.2% (新植蔗) 和 22.6%、20.8% (宿根蔗)。苗期粉垄耕作甘蔗根系和叶片的全钾含量和常规耕作差异不显著; 伸长期新植蔗叶片和根系两种耕作方式间全钾含量差异不显著, 宿根蔗叶片全钾含量粉垄耕作显著低于常规耕作, 宿根蔗根系全钾含量两种耕作方式间差异不显著; 成熟期新植蔗叶片和根系全钾含量粉垄耕作均显著低于常规耕作, 宿根蔗叶片全钾含量粉垄耕作显著低于常规耕作, 而根系全钾含量两种耕作方式间无显著差异。

甘蔗工艺成熟期, 粉垄耕作新植蔗根系和叶片干重分别为 0.41 和 0.46 kg/株, 氮积累量分别为 13.73 和 16.96 g/株, 常规耕作下, 甘蔗根系和叶片干重分别为 0.32 和 0.36 kg/株, 氮积累量分别为 8.73 和 11.92 g/株。粉垄耕作条件下, 甘蔗根系及叶片氮积累量均显著大于常规耕作甘蔗 (表 3)。

2.3 不同耕作处理对土壤容重和养分含量的影响

与常规耕作土壤相比, 不论是新植蔗还是宿根蔗, 不同时期粉垄耕作土壤的容重均显著低于常规耕作土壤, 降幅 8.6%~16.9%。粉垄耕作土壤的速效氮含量均有所提升, 除了新植蔗苗期粉垄耕作土壤的速效氮未达到差异显著水平外, 新植蔗和宿根蔗的其它生育期速效氮含量均显著高于常规耕作土壤, 增幅 8.7%~77.6%; 在所有甘蔗生长时期, 无论新植蔗还是宿根蔗土壤全磷含量差异均不显著, 但粉垄耕作土壤的有效磷含量均有所提升, 除了宿根蔗成熟期土壤的有效磷含量未达到差异显著水平外, 新植蔗和宿根蔗的其它生育期粉垄耕作土壤速效磷含量均显著高于常规耕作, 增幅 8.2%~25.6%; 在所有甘蔗生长时期, 新植蔗各生育期两种耕作方式土壤的速效钾含量差异均不显著, 宿根蔗伸长期两种耕作方式的土壤速效钾含量差异也不显著, 但在苗期和成熟期, 粉垄耕作土壤速效钾含量显著低于常规耕作土壤; 粉垄耕作土壤有机质含量在新植

表 1 两种耕作处理下甘蔗农艺性状和产量

Table 1 Agronomic traits, yield and sugar content of sugarcane under two tillage treatments

种植方式	耕作方式	出苗率 (%)	分蘖率 (%)	株高 (cm)	茎径 (cm)	有效茎 (plant/hm ²)	产量 (kg/hm ²)	糖分 (%)
Planting method	Plough method	Seedling rate	Tillering rate	Plant height	Stem diameter	Effective stem	Yield	Sugar content
新植蔗	CK	32.0 ± 1.03 b	51.2 ± 1.25 b	295.0 ± 2.57 b	2.56 ± 0.03 b	61477 ± 91 b	109814 ± 2252 b	13.86 ± 0.33 b
Newly planted sugarcane	T	40.0 ± 0.89 a	60.1 ± 2.01 a	334.0 ± 2.31 a	3.01 ± 0.08 a	64719 ± 102 a	130555 ± 3539 a	15.50 ± 0.45 a
宿根蔗	CK	17.3 ± 2.20 b	56.4 ± 9.50 a	251.9 ± 2.80 b	2.39 ± 0.90 b	41520 ± 75 b	82589 ± 1360 b	15.20 ± 0.60 a
Ratoon cane	T	22.6 ± 2.30 a	63.0 ± 7.90 a	271.2 ± 5.60 a	2.92 ± 0.50 a	49274 ± 98 a	93257 ± 1718 a	15.80 ± 0.10 a

注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 20 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 数字后不同小写字母表示处理间差异显著 Different small letters indicate significant difference between two treatments for the same planting method ($P < 0.05$).

表 2 不同耕作处理下的甘蔗养分含量 (g/kg)

Table 2 Nutrient concentrations of sugarcane plants as affected by tillage treatments

种植方式 Planting method	生长期 Growth stage	耕作方式 Tillage method	叶片 Leaf			根系 Root		
			N	P	K	N	P	K
新植蔗 Newly planted sugarcane	苗期 Seedling stage	CK	30.52 ± 0.66 a	13.34 ± 0.34 b	72.87 ± 1.76 a	27.43 ± 0.75 b	14.49 ± 0.23 b	9.12 ± 0.22 a
		T	30.61 ± 0.64 a	17.98 ± 0.29 a	73.80 ± 1.55 a	35.12 ± 0.65 a	19.29 ± 0.10 a	9.91 ± 0.24 a
	伸长期 Elongation stage	CK	32.31 ± 0.68 b	30.67 ± 0.64 b	92.76 ± 2.37 a	33.18 ± 0.80 b	17.06 ± 0.29 b	14.92 ± 0.36 a
		T	38.58 ± 0.67 a	34.34 ± 0.72 a	94.37 ± 1.98 a	38.91 ± 0.73 a	22.55 ± 0.30 a	14.49 ± 0.35 a
	成熟期 Mature stage	CK	33.06 ± 0.76 b	34.40 ± 0.76 b	74.97 ± 1.47 a	30.56 ± 0.73 b	29.73 ± 0.95 b	21.92 ± 0.53 a
		T	39.47 ± 0.70 a	36.22 ± 0.76 a	69.23 ± 1.56 b	37.26 ± 0.75 a	35.13 ± 0.36 a	17.35 ± 0.42 b
宿根蔗 Ratoon cane	苗期 Seedling stage	CK	31.80 ± 0.88 a	40.12 ± 0.84 a	59.90 ± 0.84 a	31.44 ± 0.80 b	27.44 ± 0.80 b	29.20 ± 0.70 a
		T	32.60 ± 0.71 a	39.09 ± 0.82 a	59.75 ± 0.83 a	39.62 ± 0.81 a	33.35 ± 0.66 a	29.01 ± 0.70 a
	伸长期 Elongation stage	CK	36.81 ± 0.77 b	32.57 ± 0.68 b	74.19 ± 1.56 a	36.05 ± 0.79 b	33.05 ± 0.79 b	23.23 ± 0.56 a
		T	42.57 ± 0.79 a	39.29 ± 0.72 a	70.33 ± 1.48 b	42.18 ± 0.68 a	38.44 ± 0.44 a	23.92 ± 0.57 a
	成熟期 Mature stage	CK	33.12 ± 0.70 b	27.94 ± 0.59 b	70.45 ± 1.35 a	27.31 ± 0.66 b	27.31 ± 0.66 b	20.69 ± 0.50 a
		T	36.89 ± 0.71 a	36.26 ± 0.64 a	62.75 ± 1.32 b	33.49 ± 0.66 a	32.99 ± 0.55 a	20.03 ± 0.48 a

注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 同列不同小写字母表示相同种植方法下传统与粉垄耕作之间在 5% 水平差异显著 The different small letters mean significant difference between the two tillage methods at the 5% level for the same planting method.

表 3 不同耕作方式下新植甘蔗工艺成熟期根、叶干重及氮吸收量

Table 3 Dry weight and N absorption of roots and leaves in newly planted sugarcane processing maturing stage affected by tillage treatments

耕作方式 Tillage method	器官 Organs	干重 (kg/plant) Dry weight	氮积累量 (g/plant) N accumulation
CK	根 Root	0.32 ± 0.010 b	8.73 ± 0.15 b
	叶 Leaf	0.36 ± 0.023 a	11.92 ± 0.53 a
T	根 Root	0.41 ± 0.021 b	13.73 ± 0.42 b
	叶 Leaf	0.46 ± 0.012 a	16.96 ± 0.32 a

注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 同列不同小写字母表示相同种植方法下传统与粉垄耕作之间在 5% 水平差异显著 The different small letters mean significant difference of a index between the two tillage methods at the 5% level for the same planting method.

蔗的所有生育时期和宿根蔗的苗期及成熟期均低于常规耕作, 其中在新植蔗的成熟期和宿根蔗的苗期, 粉垄耕作土壤和常规耕作土壤有机质含量差异均达显著水平 (表 4)。

2.4 不同耕作处理对甘蔗维管组织的影响

传统耕作的甘蔗茎维管束较小, 分布较疏散, 而粉垄耕作甘蔗的维管束较大, 分布密集 (图 1)。

粉垄耕作条件下, 新植蔗和宿根蔗茎的维管束面积、维管束数量、后生木质部导管直径和韧皮部面积均显著大于传统耕作, 而且新植蔗和宿根蔗茎维管束面积分别增加了 15.2% 和 16.7%, 维管束数量分别增加了 28.0% 和 17.8%; 后生木质部导管直径分别增加了 7.8% 和 7.9%, 韧皮部面积分别增加了 29.7% 和 30.8% (表 5)。

2.5 对甘蔗根系活力和氮代谢相关酶活性的影响

无论在苗期、伸长期还是成熟期, 粉垄耕作甘蔗根系活力均显著大于常规耕作甘蔗根系活力, 在苗期, 粉垄耕作甘蔗根系活力是常规耕作甘蔗根系活力的 1.29 倍; 在伸长期, 粉垄耕作甘蔗根系活力是常规耕作甘蔗根系活力的 1.39 倍, 在成熟期, 粉垄耕作甘蔗根系活力是常规耕作甘蔗根系活力的 1.25 倍 (图 2)。

在苗期、伸长期、成熟期, 粉垄耕作新植蔗谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性分别比同时期常规耕作大 149.6%、36.5% 和 65.6%, 宿根蔗也分别比同时期的常规耕作高 65.9%、36.0% 和 93.3%, 差异显著; 在苗期和伸长期, 新植蔗与宿根蔗的谷氨酰胺合成酶 (GOGAT) 活性粉垄耕作甘蔗均显著高于常规耕作甘蔗, 新植蔗苗期和伸长期分别增加 40.3% 和 69.1%, 宿根蔗苗期和伸长期分别增加 37.9% 和 42.4%; 但无

表 4 两个耕作处理下土壤容重及养分含量
Table 4 Bulk density and nutrient contents of soils as affected by tillage methods

种植方式 Planting method	生长期 Growth stage	处理 Treatment	容重 (g/cm ³) Bulk density	有机质 (g/kg) Organic matter	全N (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全K (g/kg) Total K	速效氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
新植蔗 Newly planted sugarcane	苗期 Seedling stage	CK	0.78 ± 0.05 a	38.63 ± 1.6 a	2.23 ± 0.17 a	0.350 ± 0.02 a	12.92 ± 0.39 a	287.00 ± 6.36 a	12.11 ± 0.26 b	714.03 ± 14.28 a
		T	0.68 ± 0.02 b	35.81 ± 1.70 a	1.65 ± 0.23 b	0.330 ± 0.01 a	12.86 ± 0.05 a	291.00 ± 5.83 a	13.10 ± 0.20 a	715.80 ± 28.21 a
	伸长期 Elongation stage	CK	0.82 ± 0.05 a	40.15 ± 1.20 a	1.48 ± 0.27 a	0.350 ± 0.01 a	12.47 ± 0.37 a	291.67 ± 5.83 b	11.11 ± 0.26 b	714.03 ± 14.28 a
		T	0.72 ± 0.03 b	38.83 ± 1.82 a	1.60 ± 0.14 a	0.340 ± 0.01 a	12.48 ± 0.19 a	317.00 ± 6.36 a	13.10 ± 1.10 a	715.80 ± 28.21 a
	成熟期 Mature stage	CK	0.79 ± 0.04 a	39.33 ± 1.18 a	1.75 ± 0.05 a	0.350 ± 0.01 a	12.58 ± 0.38 a	135.33 ± 12.71 b	11.27 ± 0.23 b	575.40 ± 11.51 a
		T	0.70 ± 0.01 b	36.30 ± 1.61 b	1.47 ± 0.03 b	0.350 ± 0.01 a	11.40 ± 1.40 a	240.33 ± 15.23 a	12.43 ± 0.40 a	532.32 ± 18.24 a
宿根蔗 Ratoon cane	苗期 Seedling stage	CK	0.63 ± 0.10 a	37.94 ± 1.14 a	1.75 ± 0.25 a	0.068 ± 0.002 a	22.96 ± 0.69 a	336.67 ± 7.93 b	8.83 ± 0.95 b	984.90 ± 21.70 a
		T	0.58 ± 0.01 b	32.80 ± 2.95 b	1.70 ± 0.17 a	0.070 ± 0.001 a	23.19 ± 1.30 a	382.67 ± 16.83 a	10.53 ± 0.81 a	836.10 ± 13.36 b
	伸长期 Elongation stage	CK	0.73 ± 0.01 a	39.88 ± 1.20 a	1.57 ± 0.15 a	0.072 ± 0.002 a	22.33 ± 0.07 a	352.00 ± 4.90 b	10.84 ± 0.24 b	588.51 ± 11.77 a
		T	0.63 ± 0.02 b	39.94 ± 1.04 a	1.48 ± 0.12 a	0.060 ± 0.001 a	21.75 ± 0.73 a	388.67 ± 12.21 a	13.61 ± 0.90 a	568.65 ± 82.31 a
	成熟期 Mature stage	CK	0.69 ± 0.01 a	43.69 ± 1.31 a	1.29 ± 0.04 a	0.074 ± 0.002 a	23.02 ± 0.06 a	121.33 ± 6.71 b	6.20 ± 0.03 a	715.27 ± 14.13 a
		T	0.59 ± 0.02 b	41.99 ± 1.70 a	1.26 ± 0.02 a	0.071 ± 0.001 a	23.09 ± 0.92 a	135.33 ± 7.21 a	6.29 ± 0.26 a	597.80 ± 15.25 b

注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 同列不同小写字母表示相同种植方法下传统与粉垄耕作之间在 5% 水平差异显著 The different small letters mean significant difference of a index between the two tillage methods at the 5% level for the same planting method.

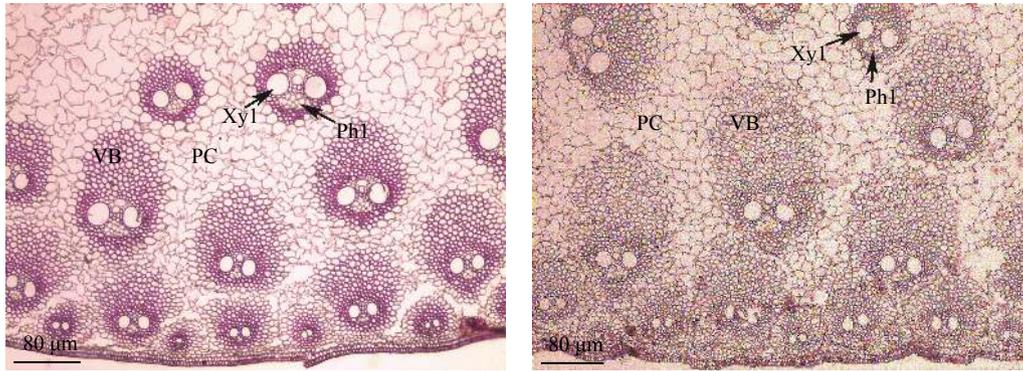


图 1 两个耕作处理对甘蔗茎解剖结构的影响

Fig. 1 The anatomical structure of sugarcane stem affected by two tillage methods

[注 (Note): 左图 Left—传统耕作 Conventional plough of 25 cm deep, 右图 Right—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep. PC—基本组织 Basic structure; VB—维管束鞘 Bundle sheath; Xyl—后生木质部 Metaxylem; Phl—韧皮部 Phloem.]

表 5 耕作方式对甘蔗维管束组织结构的影响

Table 5 The anatomical structure of sugarcane stem affected by tillage methods

种植方式 Planting method	耕作方法 Tillage method	维管束面积 (μm^2) VB area	维管束数量 Numbers of VB	后生木质部导管直径 (μm) Metaxylem vessel diameter	韧皮部面积 (μm^2) Phloem area
新植蔗 Newly planted sugarcane	CK	55697.65 \pm 1302.72 b	27.81 \pm 2.22 b	79.83 \pm 2.46 b	6199.69 \pm 126.69 b
	T	64157.13 \pm 5338.16 a	35.61 \pm 2.87 a	86.02 \pm 3.65 a	8037.95 \pm 257.59 a
宿根蔗 Ratoon cane	CK	60001.21 \pm 1320.23 b	32.52 \pm 1.23 b	83.53 \pm 2.25 b	6501.35 \pm 110.23 b
	T	70023.00 \pm 1635.21 a	38.32 \pm 2.30 a	90.15 \pm 2.54 a	8505.34 \pm 169.23 a

注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; VB—Vascular bundle; 同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference between the two tillage treatments for the same plant method ($P < 0.05$).

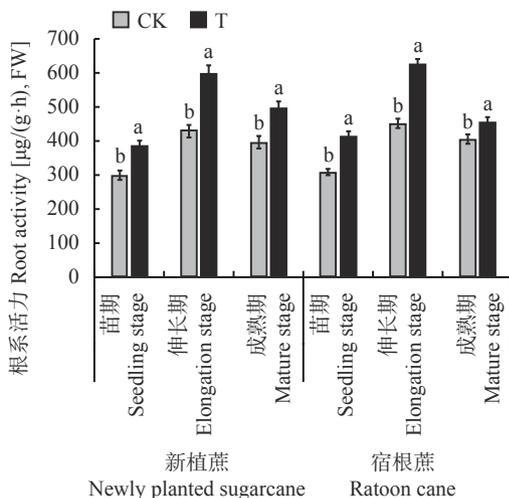


图 2 常规和粉垄耕作下甘蔗根系活力

Fig. 2 Root vitality of sugarcane under two tillage methods

[注 (Note): CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 柱上不同小写字母表示同一时期处理间差异显著 Different small letters above the bars indicate significant difference between the two tillage treatments in the same growing stage ($P < 0.05$).]

论是新植蔗还是宿根蔗成熟期谷氨酸合成酶 (GOGAT) 活性差异均不显著; 粉垄耕作宿根蔗亚硝酸还原酶 (NR) 活性除苗期显著高于常规耕作甘蔗 9.5% 外, 宿根蔗伸长期和成熟期和新植蔗所有生育期的亚硝酸还原酶 (NR) 活性差异均不显著 (图 3)。

3 讨论

3.1 粉垄耕作能改善蔗地土壤理化性质及活化有效氮

耕作方式直接或间接影响土壤的结构、水分和温度以及土壤养分的积累和分解转化^[27-29]。粉垄耕作的特点是深耕旋磨, 能聚集天然降水, 使土壤速效养分释放量增加 10%~30%^[14]。粉垄耕作整地后水田和旱地土壤中有机质、速效养分、微量元素的有效含量均有所增加。不仅如此, 土壤中的空隙、氧气含量也有所增加, 温度上升, 水分分布更加均匀, 土壤部分酶活性被激活^[13, 30]。粉垄耕作对于土壤水分及土壤团聚体形态数量、土壤微型态等也具有改良

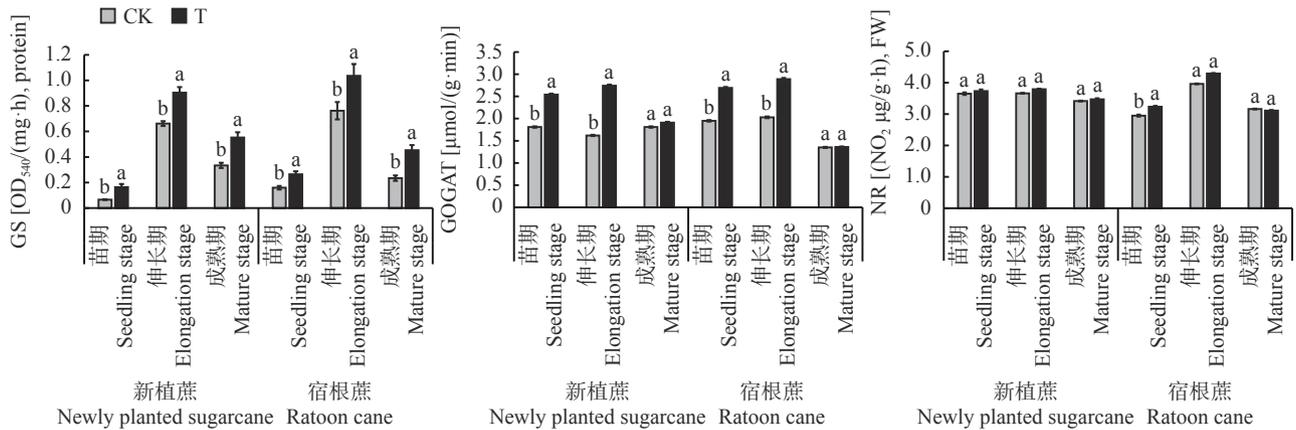


图3 两个耕作处理下甘蔗叶片酶活性

Fig. 3 The activities of enzymes in sugarcane leaves under the two tillage methods

[注 (Note): GS—谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthase; GOGAT—谷氨酸合成酶 Glutamate synthase; NR—亚硝酸还原酶 Nitrite reductase; CK—常规耕作 Conventional plough of 25 cm deep; T—粉垄耕作 Vertical and rotary plough of 40 cm deep; 柱上不同小写字母表示同一时期处理间差异显著 Different small letters above the bars indicate significant difference between the two tillage treatments in the same growing stage ($P < 0.05$).]

作用, 不仅使赤红壤中团聚体含量增加, 而且使土壤微形态趋于表面粗糙、孔隙丰富, 提高土壤蓄水保肥能力^[13, 31-32]。本研究也发现, 粉垄耕作能显著降低土壤容重, 提高土壤速效氮和有效磷含量, 但本研究粉垄耕作后对新植蔗全养分和有机质含量的影响不显著, 甚至在新植蔗苗期土壤全氮含量比常规耕作土壤低, 可能由于本研究所用耕地犁底层全氮含量比原来耕作层低, 粉垄耕作后土壤粉碎疏松, 原耕作层的部分全氮量渗透到犁底层而导致。目前广西蔗地存在过度施肥, 土壤板结等现象, 经过粉垄耕作后耕层加深, 保水保肥能力增强, 且土壤通气性好, 有利于活化有效养分, 这可能与粉垄耕作土壤速效氮与有效磷增加有关。钾肥是甘蔗生长发育必不可少的养分, 但甘蔗在伸长后期的钾含量高, 会影响制糖工艺。宿根条件下, 与新植蔗相比, 虽然蔗地理化性状及活化有效氮含量有所下降, 但各指标均优于常规耕作甘蔗。此外, 本研究发现粉垄耕作对新植蔗土壤速效钾含量的影响不显著, 但在宿根蔗苗期和成熟期, 粉垄耕作土壤速效钾含量显著降低, 这其中的原因值得进一步探讨。

3.2 粉垄耕作甘蔗组织结构有利于氮素的吸收和转运

维管束是植物输送养分和水分的重要通道, 发达的维管束组织, 有利于作物养分和水分的吸收和运输。茎秆维管束是水分、矿物质和有机养分的运输通道, 在“源库流”中行使“流”的功能^[33], 其数目、大小及功能直接影响光合产物和水分的转移,

是库大、流畅的解剖学基础^[34-35]。作物高产必须要具备的株型特征就是库大、流畅, 茎维管束与产量构成因子显著正相关^[34, 36]。本研究发现粉垄耕作甘蔗的维管束更大, 且分布更密集, 新植蔗和宿根蔗茎维管束数量、面积、后生木质部导管直径和韧皮部面积差异不大, 但与常规耕作相比, 维管束面积、维管束数量、后生木质部导管直径和韧皮部面积均显著提高, 说明粉垄耕作新植蔗和宿根蔗均具有更强大的输送养分的能力。氮素可以调控维管束的生长发育, 氮素浓度增加有利于维管束的生长^[36-38], 本研究发现粉垄耕作后土壤速效氮和有效磷含量均有所提高, 而且甘蔗根系和叶片的氮磷含量以及总量均显著提高, 这可能是粉垄耕作调控了土壤有效养分的活性, 利于粉垄耕作甘蔗吸收更多的养分元素, 而且粉垄耕作甘蔗的维管束数量多, 面积大, 输导养分和水分能力更强, 所以粉垄耕作甘蔗体内的氮磷含量也增多, 更有利于甘蔗生理代谢和生长发育, 这可能是粉垄耕作甘蔗根系发达, 植株健壮, 产量增加的组织细胞学和生理生态基础。

3.3 粉垄耕作甘蔗生理基础有利于氮代谢

粉垄耕作对土壤团聚体形态、土壤微型态等有改良作用, 土壤部分酶活性被激活, 改善土壤物理性状, 速效养分、微量元素的有效含量均有所增加, 这与粉垄耕作保证甘蔗根系往土层深处生长, 以抵御干旱、低温等不良条件^[15, 39], 提高出苗率、分蘖率, 增加功能叶数, 加快甘蔗茎径、茎长的加粗和伸长, 最终促进甘蔗增产有密切关系^[13, 31-32]。粉垄耕作与传统耕作相比, 甘蔗有效茎数、蔗汁糖分、

锤度、蔗糖含量都有所提升,最终促使甘蔗增产达20%~30%,获得了良好的经济效益^[12,17],甘蔗产量构成的主要因素有株高、茎径、单茎重和有效茎数^[40],本研究发现粉垄耕作甘蔗出苗率、分蘖率、株高、茎径、有效茎数、产量、糖分等指标均显著提高,提高幅度10%~30%。与新植蔗相比,宿根蔗各农艺性状低于新植蔗,但粉垄耕作条件下,与常规耕作相比,粉垄耕作减小了宿根蔗产量下降的幅度,对于延长宿根年限,提高甘蔗种植效益具有重要的实际意义。

土壤有效氮是植物可直接吸收利用的速效养分,能反映近期土壤氮素提供给植物吸收利用的能力,其含量的变化主要取决于植被和耕作措施等多种因素,对评价土壤肥力具有良好的表征作用^[27-29]。氮素代谢是作物最重要的生理过程之一,与作物的产量和品质有着密切关系^[41-43]。这个过程中,硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)、谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)、谷氨酸合成酶(glutamate synthase, GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(flutamate dehydrogenase, GDH)是高等植物氮代谢的主要代谢酶^[44-46]。种植方式的改变可能会对植株氮代谢活性和作物的产量性状产生影响^[47-48]。根系活力的高低直接反应养分吸收的好坏,根系活力与氮代谢能力密切相关,根系活力的升高可以增强对氮素的吸收^[49],通过提高黄瓜叶片氮代谢关键酶的活性,如硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶的活性,促进了氮代谢和氨基酸的合成,为蛋白质的合成提供了物质基础^[50-51]。本研究发现,与常规耕作比,无论是新植蔗还是宿根蔗,粉垄耕作甘蔗根系和叶片在各生长发育时期氮素的积累均显著增加,且粉垄耕作甘蔗谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、亚硝酸还原酶(NR)活性也显著增加,同时,粉垄耕作甘蔗的根系活力在整个生育期也均显著增强,说明粉垄耕作改善了土壤通气条件,有氧呼吸代谢加强,粉垄耕作甘蔗根系活力及氮代谢相关酶活性增强,可能与粉垄耕作改善土壤通气状况,活化土壤有效氮有关,根系活力及氮代谢相关酶活性增强,甘蔗根系发达,吸收水肥能力增强,促进甘蔗体内氮素转运,导致甘蔗根系和叶片氮元素增多,有利于甘蔗生长发育。

4 结论

粉垄耕作降低了土壤容重,提高了土壤中速效

养分含量,增强了根系活力和氮代谢相关酶活性,使得甘蔗根系发育良好,维管组织发达,促进甘蔗根系对氮磷的吸收,从而提高了有效茎数和茎高、茎径,提高了甘蔗产量。无论是常规耕作还是粉垄耕作,宿根蔗各生理生态指标低于新植蔗,产量因而也显著低于新植蔗,但粉垄耕作条件下,宿根蔗产量下降幅度显著低于常规耕作,说明粉垄耕作有利于延长甘蔗宿根年限,对于提高甘蔗种植效益具有积极意义。

参 考 文 献:

- [1] Cai H, Ma W, Zhang X, *et al.* Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize[J]. *The Crop Journal*, 2014, 2(5): 297-307.
- [2] Wang H, Guo Z, Shi Y, *et al.* Impact of tillage practices on nitrogen accumulation and translocation in wheat and soil nitrate-nitrogen leaching in drylands[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 153: 20-27.
- [3] Zhai L, Xu P, Zhang Z, *et al.* Improvements in grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize by optimizing tillage practice and nitrogen application rate[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(2): 666-676.
- [4] Shahzad M, Farooq M, Jabran K, *et al.* Influence of various tillage practices on soil physical properties and wheat performance in different wheat-based cropping systems[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2016, 18(4): 821-829.
- [5] Wasaya A, Tahir M, Manaf A, *et al.* Improving maize productivity through tillage and nitrogen management[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(82): 19025-19034.
- [6] Shukla S K, Yadav R L, Gupta R, *et al.* Deep tillage, soil moisture regime, and optimizing N nutrition for sustaining soil health and sugarcane yield in subtropical India[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2018, 49(4): 444-462.
- [7] 韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(20): 4330.
Wei B H. Research on smash-ridging cultivation techniques of dryland crops[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(20): 4330.
- [8] Wei B H. Discussion on the construction of green agriculture "3+1" industry system using Fenlong activated resources[J]. *Agriculture Science and Technology*, 2017, 18(2): 380-384.
- [9] Wei B H. Discussion on green development of Fenlong for yield increase, quality enhancing, water retaining and multiple use of natural resources[J]. *Agriculture Science and Technology*, 2017, 18(9): 1631-1637.
- [10] Wei B H. Fenlong cultivation—the fourth set of farming methods invented in China[J]. *Agriculture Science and Technology*, 2017, 18(11): 2045-2048.
- [11] 韦本辉, 甘秀芹, 刘斌, 申章佑. 粉垄具“耕地水库”可破广西甘蔗单产偏低困局[J]. *广西农学报*, 2012, 27(3): 48-50.
Wei B H, Gan X Q, Liu B, Shen Z Y. Powder ridge (Fenlong) as "farm-land reservoir" breaking the predicament of Guangxi sugarcane low-yield[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2012, 27(3): 48-50.

- [12] 王奇, 陈培赛, 周佳, 等. 粉垄耕作对甘蔗农艺性状及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 65–68.
Wang Q, Chen P S, Zhou J, *et al.* Effects of smash-ridging cultivation on agronomic characters and yield of sugarcane[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(4): 65–68.
- [13] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 326–335.
Wang S J, Jiang D H, Zhu W G, *et al.* Effect of Pink Ridge farming on aggregate structure of farmland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 326–335.
- [14] 韦本辉, 刘斌, 甘秀芹, 等. 粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3946–3954.
Wei B H, Liu B, Gan X Q, *et al.* Effect of Fenlong cultivation on yield and quality of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 3946–3954.
- [15] 李轶冰, 逢焕成, 李华, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部春玉米籽粒灌浆及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(14): 3055–3064.
Li Y B, Pang H C, Li H, *et al.* Effects of deep vertically rotary tillage on grain filling and yield of spring maize in North Huang–Huai–Hai region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14): 3055–3064.
- [16] 聂胜委, 张玉亭, 张巧萍, 等. 粉垄耕作对小麦玉米产量及耕层土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 930–936.
Nie S W, Zhang Y T, Zhang Q P, *et al.* Effect of smashing ridge tillage on grain yields of winter wheat and summer maize and contents of soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4): 930–936.
- [17] 韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培甘蔗试验增产效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4544–4550.
Wei B H, Gan X Q, Shen Z Y, *et al.* Yield increase of Smash-Ridging cultivation of sugarcane[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4544–4550.
- [18] 韦增林, 张亮曼, 卢国培, 等. 粉垄栽培对甘蔗产量及糖分影响初报[J]. 甘蔗糖业, 2018, (6): 37–40.
Wei Z L, Zhang L M, Lu G P, *et al.* The effect of Powder Ridge cultivation on sugarcane yield and sugar[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2018, (6): 37–40.
- [19] Almaliotis D, Therios I, Karatassiou M. Effects of nitrogen fertilization on growth, leaf nutrient concentration and photosynthesis in three peach cultivars[J]. *Acta Horticulturae*, 1997, 449: 529–534.
- [20] Ványiné A S. Effect of nitrogen doses on the chlorophyll concentration, yield and protein content of different genotype maize hybrids in Hungary[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(16): 2546–2552.
- [21] Halvorson A D, Mosier A R, Reule C A, Bausch W C. Nitrogen and tillage effects on irrigated continuous corn yields[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 63–71.
- [22] López-Bellido R J, López-Bellido L. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: Effect of tillage, crop rotation and N fertilization[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(1): 31–46.
- [23] Otto R, Silva A P, Franco H C J, *et al.* High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 117: 201–210.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil agrochemical analysis* (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao J F. *Plant physiology experiment guide*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [26] 叶尚红. 植物生理生化实验教程(第二版)[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007: 212.
Ye S H. *Plant physiology and biochemistry experiment course* (2nd edition)[M]. Kunming, Yunnan: Yunnan Science and Technology Press, 2007, 212.
- [27] 侯雪坤. 不同耕作方式下土壤耕层理化性状和生物学特性时空分布研究[D]. 黑龙江齐齐哈尔: 黑龙江八一农垦大学博士学位论文, 2011.
Hou X K. *Spatial-temporal distribution of soil physiochemical and biological properties in the cultivated layer under different tillage systems*[D]. Qiqihar, Heilongjiang: PhD Dissertation of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011.
- [28] 郑洪兵. 耕作方式对土壤环境及玉米生长发育的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2018.
Zheng H B. *Effects of tillage methods on the soil properties and maize growth*[D]. Shenyang: PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, 2018.
- [29] 曾可, 徐世宏, 韦善清, 江立庚. 土壤耕作和水分管理对水稻土壤肥力性状的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 234–237.
Ceng K, Xu S H, Wei S Q, Jiang L G. Influence of soil tillage and water irrigation on soil fertility in rice paddy[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(23): 234–237.
- [30] 韦本辉, 甘秀芹, 陈保善, 等. 农耕新方法粉垄整地土壤速效养分研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(17): 42–45.
Wei B H, Gan X Q, Chen B S, *et al.* Study on available nutrients of soil by a new method of farming which land preparation by smash-ridging[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(17): 42–45.
- [31] 王世佳, 韦本辉, 申章佑, 等. 粉垄耕作对农田砂姜黑土土壤结构的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(20): 76–79.
Wang S J, Wei B H, Shen Z Y, *et al.* Effect of deep vertically rotary tillage on the structure of Shajiang black soil in farmland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(20): 76–79.
- [32] 陈晓冰, 严磊, 陈廷速, 等. 西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 58–66.
Chen X B, Yan L, Chen T S, *et al.* Preferential flow characteristics of sugarcane soil under ridge tillage and no tillage in karst area of Southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 58–66.
- [33] 徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻穗颈维管束性状的类型间差异及其遗传的研究[J]. 作物学报, 1996, 22(2): 167–172.
Xu Z J, Chen W F, Zhang L B, *et al.* Study on the type difference and heredity of vascular bundle characters in the ear neck of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(2): 167–172.
- [34] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, Shen Q R. Contribution of nitrification happened in rhizospheric soil growing with different rice cultivars to N nutrition[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2007, 43(4): 417–425.
- [35] Briones A M, Okabe S, Umemiya Y, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria on root bio-films and their possible contribution to N use

- efficiency of different rice cultivars[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(2): 335–348.
- [36] 潘春香, 肖艳辉, 何金明, 王玉珍. 施氮水平对枇杷幼苗生长及根初生维管组织的影响[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(13): 6–8.
Pan C X, Xiao Y H, He J M, Wang Y Z. Effects of different nitrogen levels on seedling growth and root primary vascular system of the Loquat trees[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(13): 6–8.
- [37] 朱天琦, 刘晓静, 张晓玲. 氮营养调控对紫花苜蓿根系形态及其解剖结构的影响[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1290–1295.
Zhu T Q, Liu X J, Zhang X L. Effects of nitrogen on root morphology and anatomical structure of alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1290–1295.
- [38] 陈阳, 孙华山, 金一锋, 等. 氮素调控对草地早熟禾解剖结构及组织碳氮含量的影响[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(4): 35–40.
Chen Y, Sun H S, Jin Y F, *et al.* Effects of nitrogen regulation on the anatomical structure, carbon and nitrogen contents in tissues of kentucky bluegrass[J]. *Grassland and Turf*, 2018, 38(4): 35–40.
- [39] Guan D, Al-Kaisi M M, Zhang Y, *et al.* Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 89–97.
- [40] 谭秦亮, 朱鹏锦, 程琴, 等. 不同甘蔗品种(系)的产量构成因素及品质比较[J]. *作物杂志*, 2019, (3): 49–54.
Tan Q L, Zhu P J, Cheng Q, *et al.* Comparison study on the yield components and quality of different sugarcane varieties (lines)[J]. *Crops*, 2019, (3): 49–54.
- [41] 金容, 郭萍, 周芳, 等. 控释氮肥比例对玉米氮代谢关键酶活性及干物质积累的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(6): 729–736.
Jin R, Guo P, Zhou F, *et al.* Effects of controlled-release nitrogen fertilizer ratio on the nitrogen metabolism key enzymes activities and dry matter accumulation of maize[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(6): 729–736.
- [42] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(370): 773–787.
- [43] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(11): 2055–2063.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, *et al.* Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11): 2055–2063.
- [44] 胡霁堂, 陆景陵. 植物营养学(第二版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
Hu A T, Lu J L. *Plant nutrition* (2nd edition)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [45] Lam H M, Coschigano K T, Oliveira I C, *et al.* The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 1996, 47(4): 569–593.
- [46] 刘淑云, 董树亭, 赵秉强, 等. 长期施肥对夏玉米叶片氮代谢关键酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(2): 278–283.
Liu S Y, Dong S T, Zhao B Q, *et al.* Effects of long-term fertilization on activities of key enzymes related to nitrogen metabolism (ENM) of maize leaf[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(2): 278–283.
- [47] 汪和廷, 董慧, 齐龙昌, 等. 种植方式及施氮量对水稻灌浆初期氮代谢关键酶活性和产量性状的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1201–1214.
Wang H T, Dong H, Qi L C, *et al.* Effects of cultivation method and nitrogen application rate on key enzyme activities of nitrogen metabolism at early milky stage and grain yield of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1201–1214.
- [48] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 施氮量对不同品种水稻氮素利用及碳氮代谢关键酶的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(3): 325–330.
Cong X H, Shi F Z, Ruan X M, *et al.* Effects of nitrogen application rate on nitrogen use efficiency and key enzymes for carbon and nitrogen metabolism in different rice varieties[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(3): 325–330.
- [49] 高青海, 王亚坤, 陆晓民, 苗永美. 作物秸秆对黄瓜衰老中根系活力和叶片氮代谢的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 23(6): 87–91.
Gao Q H, Wang Y K, Lu X M, Miao Y M. Effects of crop straw on root activity and leaf nitrogen metabolism of cucumber during senescence[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 23(6): 87–91.
- [50] Jordi W, Schapendonk A, Davelaar E, *et al.* Increased cytokinin levels in transgenic P-SAG12-IPT tobacco plants have large direct and indirect effects on leaf senescence, photosynthesis and N partitioning[J]. *Plant Cell Environ*, 2000: 279–289.
- [51] 刘连涛, 李存东, 孙红春, 等. 氮素营养水平对棉花不同部位叶片衰老的生理效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 910–914.
Liu L T, Li C D, Sun H C, *et al.* Physiological effects of nitrogen nutrition on the senescence of cotton leaves at different positions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(5): 910–914.